

# $^{140}\text{Tb}$ 和 $^{141}\text{Dy}$ 的 $\beta$ 缓发质子衰变以及 $^{143}\text{Dy}$ 的自旋宇称\*

徐树威<sup>1;1)</sup> 谢元祥<sup>1</sup> 邢焯炳<sup>1</sup> 许甫荣<sup>2</sup> 刘红亮<sup>2</sup> 李占奎<sup>1</sup>

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (北京大学技术物理系 北京 100087)

**摘要** 利用 $^{40}\text{Ca}+^{106}\text{Cd}$ 融合蒸发反应产生了近质子滴线核 $^{140}\text{Tb}$ 和 $^{141}\text{Dy}$ ,配合氦喷嘴带传输系统采用“质子- $\gamma$ ”符合方法观测了它们的 $\beta$ 缓发质子衰变,其中包括半衰期、质子能谱和衰变到第二代子核不同低位态的分支比.通过统计理论拟合提取了 $^{140}\text{Tb}$ 和 $^{141}\text{Dy}$ 的基态自旋宇称分别为 $7^\pm$ 和 $9/2^\pm$ .另一方面,用Woods-Saxon Strutinsky方法计算了这两种核限制组态的势能面,由此得到 $^{140}\text{Tb}$ 和 $^{141}\text{Dy}$ 的基态自旋宇称分别为 $7^+$ 和 $9/2^-$ .此外用同一方法还计算了 $^{143}\text{Dy}$ 的核势能面,从中看出 $^{143}\text{Dy}$ 存在有自旋宇称为 $1/2^+$ 的基态和一个激发能为198keV的 $11/2^-$ 的同质异能态.该结果与2003年Eur.Phys.J. A16:347—351中的 $^{143}\text{Dy}$ 衰变实验数据相符.

**关键词**  $\beta$ 缓发质子衰变 自旋宇称 核势能面

1986年美国LBL实验室的Wilmarth等人<sup>[1]</sup>利用在线同位素分离器研究和发表过近质子滴线核 $^{140}\text{Tb}$ 和 $^{141}\text{Dy}$ 的 $\beta$ 缓发质子( $\beta_p$ )衰变的实验结果.据他们报道: $^{140}\text{Tb}$ 和 $^{141}\text{Dy}$ 的 $\beta_p$ 衰变半衰期分别为 $(2.4\pm 0.5)$ 和 $(0.9\pm 0.2)$ s.此外他们还观测到了 $^{141}\text{Dy}$ 的 $\beta_p$ 衰变后所产生的329和508keV的 $\gamma$ 射线,这两条 $\gamma$ 射线分别对应于第二代子核 $^{140}\text{Gd}$ 的 $2^+ \rightarrow 0^+$ 和 $4^+ \rightarrow 2^+$ 的跃迁.1989年LBL的Gilat<sup>[2]</sup>又指出:Wilmarth等人实验观测的329和508keV的 $\gamma$ 射线强度比与假定先驱核 $^{141}\text{Dy}$ 的自旋宇称为 $1/2^+$ 或为 $11/2^-$ 时计算的均不相符,因而只好说成是这两种自旋宇称态的混合贡献.Gilat则建议 $^{141}\text{Dy}$ 的自旋宇称取为某单一的中间值 $9/2^-$ ,而且他的壳模型计算也支持这一建议.1991年Firestone等人<sup>[3]</sup>报道观测到了 $^{140}\text{Tb}$ 的( $\text{EC}+\beta^+$ )衰变所产生的两条衰变 $\gamma$ 射线,并初步建议它的自旋宇称为 $5^+$ .2000年,文献[4]报道了 $^{140}\text{Tb}$ ( $\text{EC}+\beta^+$ )衰变比较详细的数据,其半衰期被测定为 $(2.1\pm 0.4)$ s.并由此建议 $^{140}\text{Tb}$ 的自旋宇称应为 $7^+$ .本文旨在报道对 $^{140}\text{Tb}$ 和 $^{141}\text{Dy}$ 的 $\beta_p$ 衰变实验研

究的进一步结果.希望能够澄清前期文献中的相关结论.

本实验是在中国科学院兰州重离子加速器国家实验室进行的.图1是本实验装置的示意图.由SFC加速器引出的能量为232MeV的 $^{40}\text{Ca}^{12+}$ 重离子束,先穿过1.89mg/cm<sup>2</sup>厚的Havar窗,进入充满一个大气压氦气的靶室,穿过4.2cm的氦气层,再经过铝降能片,最后轰击4块富集的、自支撑的同位素靶 $^{106}\text{Cd}$ .靶子的富集度为75%,其平均厚度为1.8mg/cm<sup>2</sup>.这4块靶子均匀安放在一个冷却的黄铜转轮上,转轮每两分半钟转动90°.束流达到靶芯部位的能量约为182MeV.束流强度约为40pA. $^{140}\text{Tb}$ 和 $^{141}\text{Dy}$ 是分别通过融合蒸发 $\alpha p n$ (或 $3p3n$ )和 $\alpha n$ (或 $2p3n$ )反应道产生的.反应产物在靶室中慢化并附着在添加剂的大分子团上,经过氦喷嘴驱动喷射到放置于收集室的传送带上.然后快速带传输系统把附着在传送带上的放射性产物周期性地送到屏蔽好的低本底区,进行p- $\gamma$ (X)-t符合测量,以便观测反应产物的 $\beta$ 缓发质子衰变<sup>[5-7]</sup>.放射性收集时间、传送带移动时间、等待时间和测量时间分别

2005-09-29 收稿

\*国家自然科学基金(10375078, 10475002)资助

1) E-mail: xsw@impcas.ac.cn

为 1.00, 0.16, 0.16 和 0.84s. 毛细管的长度 6m. 所用添加剂是  $\text{PbCl}_2$ , 其工作温度大约为  $430^\circ\text{C}$ . 2 块全耗尽的  $570\text{mm}^2 \times 350\mu\text{m}$  的金硅面垒半导体探测器用来测量质子. 它们被分别放置在传送带的两侧. 在每一块金硅面垒探测器背后放有一台  $\text{HPGe}(\text{GMX})$  型探测器测量  $\gamma(\text{X})$  射线. 测得的质子和  $\gamma(\text{X})$  射线的能谱和时间谱分别用符合方式或单谱方式获取.

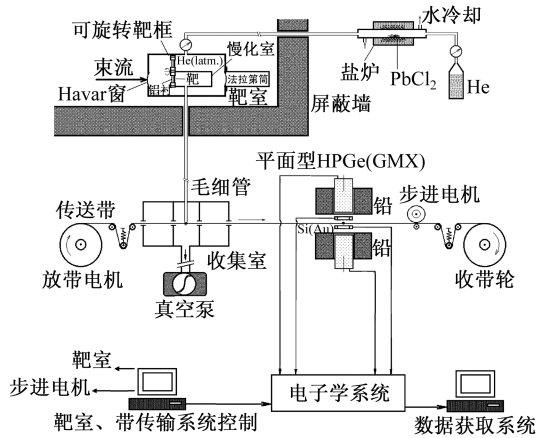


图 1 实验装置示意图

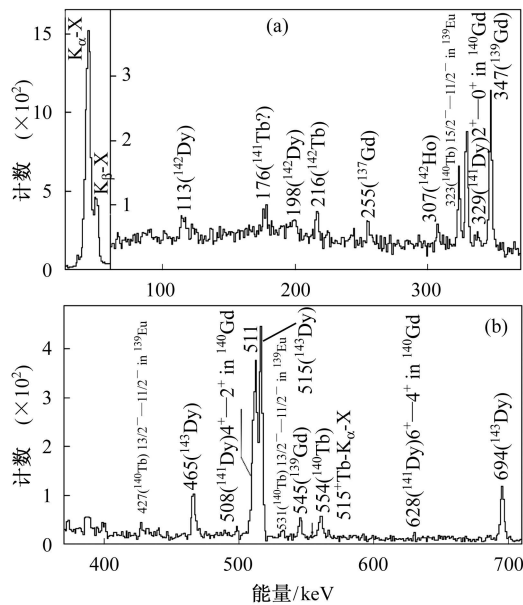


图 2 用 3.0—7.0MeV 的质子开门的, 属于反应产物的衰变  $\gamma(\text{X})$  谱

图 2 是用 3.0—7.0MeV 的质子开门得到的反应产物的衰变  $\gamma(\text{X})$  谱. 除 511keV  $\gamma$  射线和 X 射线外, 在图 2 中所有的强  $\gamma$  射线所属的  $\beta\text{p}$  先驱核都被标记出来了. 其中, 323, 427 和 531keV  $\gamma$  射线被指认属于  $^{140}\text{Tb}$  的  $\beta\text{p}$  衰变的第二代子核  $^{139}\text{Eu}$  的  $15/2^- \rightarrow 11/2^-$  跃迁和两种不同的  $13/2^- \rightarrow 11/2^-$  跃迁<sup>[8]</sup>. 与第二代子核  $^{139}\text{Eu}$  的  $19/2^- \rightarrow 15/2^-$  跃迁对应的 554keV 处没

有看到任何小峰. 329, 508 和 628keV  $\gamma$  射线被指认属于  $^{141}\text{Dy}$  的  $\beta\text{p}$  衰变的第二代子核  $^{140}\text{Gd}$  的  $2^+ \rightarrow 0^+$ ,  $4^+ \rightarrow 2^+$  和  $6^+ \rightarrow 4^+$  的跃迁<sup>[9]</sup>.

图 3 给出了 323keV  $\gamma$  射线开门的缓发质子能谱. 其中右上角是缓发质子开门的 323keV  $\gamma$  射线的时间衰变曲线, 由此得到的  $^{140}\text{Tb}$  的衰变半衰期为  $(2.0 \pm 0.5)\text{s}$ . 这与 Wilmarth 等人<sup>[1]</sup> 和文献[4]的报道是相符的.

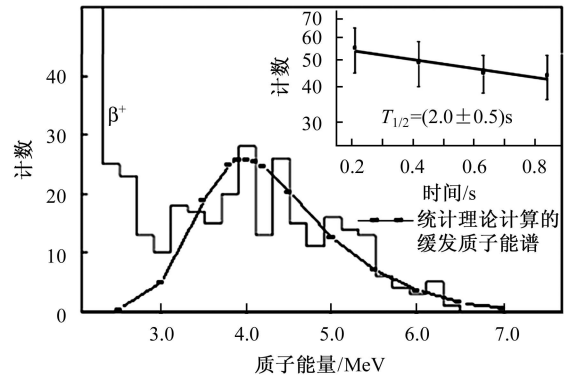


图 3 用 323keV 特征  $\gamma$  射线开门的缓发质子能谱以及符合衰变曲线 (右上角)

利用统计模型<sup>[10]</sup> 计算了  $^{140}\text{Tb}$  经过  $\beta$  缓发质子衰变后, 布居到第二代子核  $^{139}\text{Eu}$  的不同低位态的相对分支比. 其中  $\beta$  强度函数是根据粗糙理论<sup>[11]</sup> 估计的. 其结果列在表 1 中. 我们实验估计的布居到 323, 427, 531 和 877keV 低位态的分支比分别为:  $30 \pm 4$ ,  $12 \pm 3$ ,  $8.5 \pm 2$  和  $< 1$ . 从表 1 可见  $^{140}\text{Tb}$  的初始态的自旋宇称取  $7^+$  或  $7^-$  比较合理. 另外从图 3 可见, 取  $^{140}\text{Tb}$  的初始态的自旋宇称为  $7^+$  或  $7^-$  由统计模型理论计算得到的缓发质子能谱非常相近 (其差别在图中几乎看不出), 它们与实验谱都符合得很好.

表 1 对于  $^{140}\text{Tb}$  的  $\beta$  缓发质子衰变, 假设不同的初始态的自旋和宇称计算得到的衰变布居到第二代子核  $^{139}\text{Eu}$  的不同低位态的相对分支比

初始态的自旋和宇称	基态	323keV	427.2keV	531keV	877keV
	(11/2 <sup>-</sup> )	(15/2 <sup>-</sup> )	(13/2 <sub>1</sub> <sup>-</sup> )	(13/2 <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	(19/2 <sup>-</sup> )
6 <sup>+</sup>	66.9	13.0	12.1	7.9	0.1
6 <sup>-</sup>	63.3	14.2	13.4	8.8	0.2
7 <sup>+</sup>	46.5	27.8	15.1	9.7	0.9
7 <sup>-</sup>	45.6	29.5	14.6	9.6	0.7
8 <sup>+</sup>	28.9	44.4	13.4	8.7	4.5
8 <sup>-</sup>	24.7	43.6	15.6	10.3	5.7

$B_p = 3.18\text{MeV}$

图 4 给出了 329keV  $\gamma$  射线开门的缓发质子能谱. 其中右上角是缓发质子开门的 329keV  $\gamma$  射线的时间衰变曲线, 由此得到的  $^{141}\text{Dy}$  的衰变半衰期为  $(0.9 \pm 0.2)\text{s}$ . 这与 Wilmarth 等人<sup>[1]</sup> 的报道是相符的.

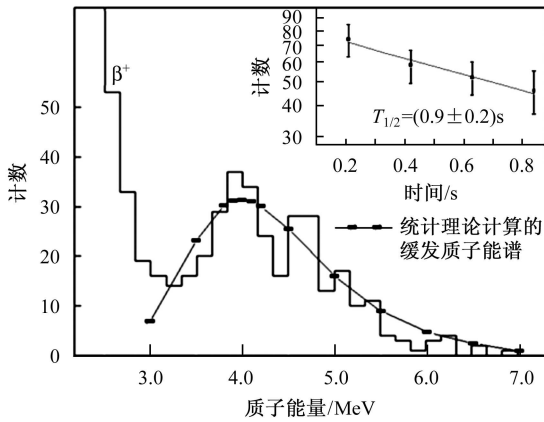


图4 用329keV特征 $\gamma$ 射线开门的缓发质子能谱以及符合的329keV  $\gamma$ 射线的衰变曲线(右上角)

利用统计模型计算了 $^{141}\text{Dy}$ 经过 $\beta$ 缓发质子衰变后,布居到第二代子核 $^{140}\text{Gd}$ 的不同低位态的相对分支比,其结果列在表2之中.实验估计的布居到328.6, 836.2和1464keV的分支比分别为:  $50 \pm 6$ ,  $39 \pm 8$ 和 $7 \pm 4$ .从表2可见 $^{141}\text{Dy}$ 初始态的自旋宇称取 $9/2^+$ 或 $9/2^-$ 比较合理.另外从图4可见,取 $^{141}\text{Dy}$ 初始态的自旋宇称为 $9/2^+$ 或 $9/2^-$ 由统计模型理论计算得到的缓发质子能谱非常相近(其差别在图中几乎看不出来),它们与实验能谱都符合得很好.

表2 对于 $^{141}\text{Dy}$ 的 $\beta$ 缓发质子衰变,假设不同的初始态的自旋和宇称计算得到的衰变布居到第二代子核 $^{140}\text{Gd}$ 的不同低位态的相对分支比

初始态的 自旋和宇称	基态 ( $0^+$ )	328.6keV ( $2^+$ )	836.2keV ( $4^+$ )	1464keV ( $6^+$ )
$7/2^+$	18.0	59.4	22.1	0.4
$7/2^-$	12.8	64.0	22.5	0.7
$9/2^+$	4.9	49.2	41.1	4.8
$9/2^-$	9.5	48.6	38.8	3.1
$11/2^+$	3.9	32.3	50.1	13.6
$11/2^-$	1.2	29.3	55.3	14.3

$B_p = 0.50\text{MeV}$

利用Woods-Saxon Strutinsky方法<sup>[12]</sup>计算了 $^{140}\text{Tb}$ 和 $^{141}\text{Dy}$ 的组态限制的核势能面(图5).在 $^{140}\text{Tb}$ 的势能面中看到在 $\beta_2=0.243$ 和 $\gamma=22.5^\circ$ 处存在一个极小,它对应的组态是 $7^+(\pi 5/2^- [532] \times \nu 9/2^- [514])$ .而在 $^{141}\text{Dy}$ 的势能面中看到在 $\beta_2=0.242$ 和 $\gamma=21.5^\circ$ 处存在一个极小,它对应的组态是 $9/2^- (\nu 9/2^- [514])$ .可见,这种理论计算的自旋宇称与上述实验数据的提取

值是一致的.所以本工作最终指认 $^{140}\text{Tb}$ 的自旋宇称为 $7^+$ ,与通过 $^{140}\text{Tb}$ 的 $(\text{EC}+\beta^+)$ 衰变纲图<sup>[4]</sup>所指认的结果相同;本工作也指认 $^{141}\text{Dy}$ 的自旋宇称为 $9/2^-$ ,与Gilat<sup>[2]</sup>的建议相同.

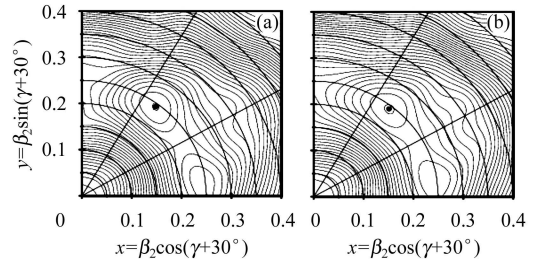


图5 计算得到的 $^{140}\text{Tb}$ (a)和 $^{141}\text{Dy}$ (b)的核势能面

Audi等人<sup>[13]</sup>根据系统学推测 $^{143}\text{Dy}$ 的基态为 $1/2^+$ .此后,在束 $\gamma$ 谱学研究也初步指认 $^{143}\text{Dy}$ 的基态为 $1/2^+$ ,并且指出还存在一个可能的 $11/2^-$ 的同质异能态,具有310.7keV的激发能<sup>[14]</sup>.我们利用同一核反应产生和研究过 $^{143}\text{Dy}$ 的衰变<sup>[15]</sup>.在观测 $^{143}\text{Dy}$ 的衰变时活性的收集时间与测量时间设置得长一些,因为 $^{143}\text{Dy}$ 的半衰期相对长一些.并且通过分析实验数据还分别建立了 $^{143}\text{Dy}$ 的 $1/2^+$ 基态和 $11/2^-$ 同质异能态的,同时包括 $\beta_p$ 和 $(\text{EC}+\beta^+)$ 衰变的衰变纲图.利用Woods-Saxon Strutinsky方法计算了 $^{143}\text{Dy}$ 的组态限制的核势能面,其结果是 $^{143}\text{Dy}$ 的基态自旋和宇称为 $1/2^+$ ,对应的组态是 $\nu 1/2 [400]$ ,但混杂有 $\nu 3/2 [402]$ 的组分,其四极形变 $\beta_2=0.202$ , $\gamma=26^\circ$ (见图6(a)).并存在一个激发能为194keV的 $11/2^-$ 同质异能态,其四极形变 $\beta_2=0.198$ , $\gamma=47^\circ$ (见图6(b)).理论计算进一步支持了实验的指定.

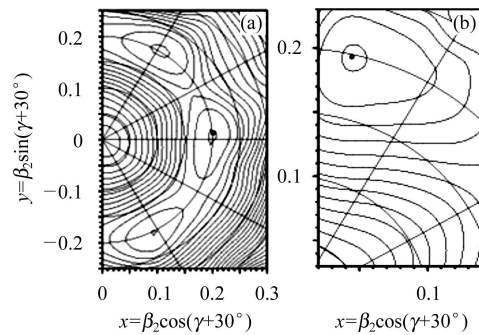


图6 计算得到的 $^{143}\text{Dy}$ 的基态(a)和同质异能态(b)的核势能面

## 参考文献(References)

- 1 Wilmarth P A, Nitschke J M, Firestone R B et al. *Z. Phys.*, 1986, **A325**: 485—486
- 2 Gilat J, Nitschke J M, Wilmarth P A et al. *Phys. Rev.*, 1989, **C40**: 2249—2259
- 3 Firestone R B, Gilat J, Nitschke J M et al. *Phys. Rev.*, 1991, **C43**: 1066—1085
- 4 XU S W, XIE Y X, YU Y et al. *Eur. Phys. J.*, 2000, **A8**: 437—439
- 5 XU S W, XIE Y X, LI Z K et al. *Phys. Rev.*, 1999, **C60**: 061302(R)
- 6 XU S W, XIE Y X, LI Z K et al. *Z. Phys.*, 1996, **A356**: 227—229
- 7 LI Z K, XU S W, XIE Y X et al. *Phys. Rev.*, 1997, **C56**: 1157—1159
- 8 Burrows T W. *Nucl. Data Sheets*, 2001, **92**: 759—767
- 9 Peker L K. *Nucl. Data Sheets*, 1994, **73**: 261—350
- 10 Hornshoj P, Wilsky K, Hansen P G et al. *Nucl. Phys.*, 1972, **A187**: 609—623
- 11 Takahashi K, Yamada M, Kondoh T. *At. Data Nucl. Data Tables*, 1973, **12**: 101—142
- 12 Nazarewicz W, Dudek J, Bengtsson R et al. *Nucl. Phys.*, 1985, **A435**: 397—447
- 13 Audi G, Bersillon O, Blachot J et al. *Nucl. Phys.*, 1997, **A624**: 1—124
- 14 Tuli J K. *Nucl. Data Sheets*, 2001, **94**: 771—777
- 15 XU S W, XIE Y X, LI Z K et al. *Eur. Phys. J.*, 2003, **A16**: 347—351

## $\beta$ -Delayed Proton Decays of $^{140}\text{Tb}$ and $^{141}\text{Dy}$ as Well as the Spin and Parity of $^{143}\text{Dy}$ \*

XU Shu-Wei<sup>1,1)</sup> XIE Yuan-Xiang<sup>1</sup> XING Ye-Bing<sup>1</sup> XU Fu-Rong<sup>2</sup> LIU Hong-Liang<sup>2</sup> LI Zhan-Kui<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

<sup>2</sup> (Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract**  $^{140}\text{Tb}$  and  $^{141}\text{Dy}$  were produced via fusion evaporation in the reaction  $^{40}\text{Ca}+^{106}\text{Cd}$ . Their  $\beta$ -delayed proton decays were studied by means of “p- $\gamma$ ” coincidence in combination with a He-jet tape transport system, including half-lives, proton energy spectra,  $\gamma$ -transitions following the proton emissions, and the branching ratios to the low-lying states in the grand-daughter nuclei. The ground-state spins and parities of  $^{140}\text{Tb}$  and  $^{141}\text{Dy}$  were extracted as  $7^{\pm}$  and  $9/2^{\pm}$ , respectively, by fitting the experimental data with a statistical model calculation. The configuration-constrained nuclear potential energy surfaces (NPES) of  $^{140}\text{Tb}$  and  $^{141}\text{Dy}$  were calculated by using the Woods-Saxon Strutinsky method, which indicate the ground-state spins and parities of  $^{140}\text{Tb}$  and  $^{141}\text{Dy}$  to be  $7^{+}$  and  $9/2^{-}$ , respectively. In addition, the configuration-constrained NPES of  $^{143}\text{Dy}$  was also calculated by using the same method. From the NPES a  $1/2^{+}$  ground state and a  $11/2^{-}$  isomer with the excitation energy of 198keV were found. The calculated results are consistent with our experimental data on the decay of  $^{143}\text{Dy}$  reported in *Eur. Phys. J.*, 2003, A16: 347—351.

**Key words**  $\beta$ -delayed proton decay, spin and parity, nuclear potential energy surface

---

Received 29 September 2005

\*Supported by National Natural Science Foundation of China (10375078, 10475002)

1) E-mail: xsw@impcas.ac.cn